

북한강 수계 충적평야의 지하수 수질 모니터링 연구

○ 최중대¹⁾ · 장석오¹⁾ · 최병용¹⁾ · 류순호²⁾
강원대학교 농업공학부¹⁾ · 서울대학교 응용생물화학부²⁾

1. 서 론

산업화 시대가 도래하면서 기후변화, 오존층 파괴, 삼림의 파괴, 사막화, 비점원 오염과 같은 범 지구적인 환경문제가 대두하고 있다. 비점원 오염물질은 지하수나 지표수에 관계없이 식수를 오염시키는 가장 큰 오염원으로 이미 인정받고 있다 (Duda, 1993). 비점원오염이란 토지이용이나 오염된 대기 때문에 발생하는 지표수 및 지하수의 오염을 말하며 따라서 어느 한 지점이 오염원을 배출하는 지점이라고 단정할 수 없는 넓은 지역에서 동시다발적으로 일어나는 오염을 말한다 (Magette, 1989).

농경지에 기인하는 비점원 오염이 수계의 수질에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구에서 최중대 등(1999)은 지하수와 하천수의 질소농도는 매우 밀접한 관계를 가진다고 발표하였다. 이들은 또한 벼농사 위주의 농업구역에서 지하수의 수질은 논외 담수 및 강우량과 관계가 있다고 보고하였다. 그러나 도시 근교의 복잡한 토지이용지역에서의 지하수 수질은 토지이용, 강우 등 다양한 조건에 영향을 받을 수 있을 것이라고 예상을 할 수 있으나 이를 검증할 수 있는 지하수 수질 모니터링 자료는 보고되지 않았다. 따라서 본연구는 북한강 수계 충적평야의 토지이용별 지하수의 질소농도를 모니터링하여 자료를 축적하고, 토지이용별 및 계절별 지하수의 질소농도 변화를 분석하기 위한 목적으로 수행되었다.

2. 재료 및 방법

연구구역은 북한강 유역의 농업지대를 대표할 수 있는 강원도 춘천시 신북읍 울문리, 산천리 및 유포리 지역으로 내륙분지에 형성된 약 10.8 km²의 충적평야지대이다(Figure 1). 유역의 남쪽으로는 소양강이 흐르고 있고 서쪽과 북쪽으로는 작은 지방하천이 유역의 2면을 감싸며 소양강으로 흐르고 있어 3면이 하천으로 둘러싸인 삼각주나 선상지 모양을 하고 있다. 충적층은 지역에 따라 다소 차이가 있으나 일반적으로 표토(제1층)는 약 1 m 깊이의 양토, 그리고 제2층은 약 4~5 m 정도로 자갈, 모래, 혹은 양토 등이 층을 이루거나 혼합되어 있다. 제2층 이하는 화강암 풍화암대가 위치하고 있다. 따라서 연구구역의 표토를 제외한 나머지 층은 투수계수가 비교적 큰 모래, 자갈 및 양토 등으로 구성되어 있어 얇은 지하수의 부존량이 상대적으로 크고 지하수의 유동이 빠를 것으로 예측된다. 유역의 표토는 미사질 양토가 주종을 이루며 비옥하기 때문에 집약적 근교 농업이 발달하였다. 비닐하우스를 이용한 토마토, 호박, 오이 등 특수작물의 연중재배가 성행하고 있으며 또한 많은 군사시설이 혼재하고 있다.

지하수 수질조사는 유역내의 관측정을 선정하고 처음 1년간은 2주에 한번씩 그리고 2년차부터는 한달에 한번씩 지하수 수질샘물을 채취하여 분석하였다. 토지이용에 따른 관측정은 유역의

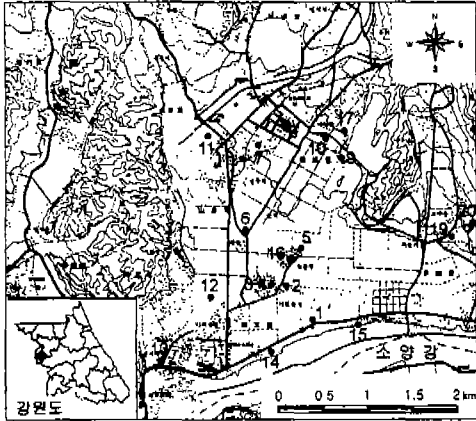


Fig. 1 Location map of the monitoring sites and well numbers.

Table 1 Grouping of the monitoring wells with respect to land use

Land use	Monitoring well numbers
Residential	7, 11, 13, 14, 15, 19
Arable	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 19
Greenhouse	1, 7
Livestocks	16, 18
Control	5, 17, 20

지하수의 수질을 대표할 수 있는 지역을 선정하였고, 관측정으로 선정된 펌프는 소유농민과 협의하여 연구기간 동안 주기적으로 시료채취를 할 수 있도록 양해를 받았다. 제1차년도에는 7개 우물을 선정하여 1996년 11월부터 지하수 수질시료를 채취하여 분석하였다 (Fig. 1, 관측정번호 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10). 지하수 수질분석결과 유역의 지하수 수질의 변화를 기술하기 위해서는 관측정의 숫자를 늘릴 필요가 있어 제 2차로 8곳의 관측정을 추가로 선정하여 1997년 4월 7일부터 수질시료를 채취하여 분석하였다(Fig. 1, 관측정번호 5, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15). 1997년 7월 26일부터는 제 3차로 5곳의 관측정을 추가로 선정하여 총 20곳의 수질시료를 채취하여 분석하였다 (Fig. 1, 관측정번호 16, 17, 18, 19, 20). 다만, 관측정 18은 연구유역외의 유사한 농업지대에 설치하였다. 수질분석은 서울대학교 농업생명과학대학 농화학과 토양학연구실에서 관계규정에 의해 분석되었다. 분석항목은 전기전도도(EC), Org-N, NH₄-N, NO₃-N, T-N을 대상으로 실시하였다. 수질은 분석항목당 34회 분석되었으며 토지이용은 주거지역, 농업지역, 시설재배지역, 축산지역, 상류부의 자연수질지역(Control area) 등 5개로 구분하였다. Table 1은 토지이용에 따라 분류한 각각의 관측정 번호를 나타냈다. 관측정의 일부는 그 위치에 따라 2곳 이상의 토지이용 그룹에 분류되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유역의 개황 및 강우자료의 분석

연구유역에는 1999년 현재 총 2,453가구 7,630명이 거주하고 있으며, 하류부의 군부대 시설과 신북읍 도시지역을 제외하고는 대량의 생활하수를 방출하는 대중음식점이나 사업체가 없는 전형적인 농업유역이다. 연구유역의 경지면적은 논이 378.9 ha, 밭이 402.0 ha로 총 780.9 ha이며 논과 밭의 비율은 비슷하다. 유역의 상류부는 작은 구릉지(산지)로 구성되어 있다. 주요한 밭작물은 고추, 콩, 배추, 들깨, 무 등이며 비닐하우스 시설재배지에서는 토마토, 호박, 오이, 상추, 시금치 등으로 연중무휴 재배가 이루어지는 곳이 많다.

유역의 강우자료는 춘천기상대 자료를 사용하였다. 1996년 11월부터 1997년 10월까지 1차년도 연구기간에는 943.5 mm, 1997년 11월부터 1998년 10월까지 2차년도 연구기간에는 1,747.2 mm 그리고 1998년 11월부터 1999년 10월까지 3차년도 연구기간에는 1669.6mm가 내려 2차년도가 1차년

도보다 803.7 mm 많았고 3차년도는 1차년도에 비해 726.1mm가 많았다. Table 2는 연구기간내의 강수량을 나타낸 것으로 1차년도에는 5월에 31.8% 그리고 8월에 16.5%가 내려 두달 동안에 연강수량의 48.3%의 강수량 집중현상을 보였다. 2차년도에는 7월에 21.4% 그리고 8월에 38.8%가 내려 두 달 동안에 연강수량의 60.2%가 내렸다. 3차년도에는 8월에 33.7% 그리고 9월에 20.9%가 내렸다. 1차년도에는 5월에 강수가 집중되었지만 2차년도와 3차년도에는 8월에 강수가 집중되었다. 이와 같은 강수의 변화는 농어촌유역에서 비점원 오염물질의 유출에 많은 영향을 미칠 수 있다. 농촌유역에서의 비점원 오염물질의 유출은 월별강수량의 차이뿐만 아니라 단위강수의 지속시간과 강우강도에도 많은 영향을 받는다. 또한 투수계수가 큰 토양에서는 지하수를 통한 비점원 오염물질의 유입 증가로 하천수질에도 상당한 영향이 있는 것으로 보고되고 있다 (최중대, 1999)⁴⁾. 본 연구유역은 투수계수가 큰 미사질 양토층으로 구성되어 있기 때문에 강우시 다른지역에 비해서 상대적으로 지하침투량이 클 것으로 예측된다. 따라서 지하수 오염부하량 변화는 강우량에 많은 영향을 받을 것으로 생각된다.

3.2 수질분석 결과

3.2.1 전기전도도 (EC)

EC는 상류부 관측정에서 낮게 나타났고 하류부로 이동하면서 점차 증가하는 경향을 보였다. 자연수질지역(control)의 EC 중앙값은 0.112 dS/m로 다른 토지이용지역 중간값의 32~50% 정도였다. 자연수질지역은 비교적 청정수질을 보이는데 비하여 인간의 간섭이 이루어지는 여타 토지이용지역은 상대적으로 수질이 저하되고 있음을 나타냈다. Fig. 2는 토지이용별 EC의 변화양상과 강우의 관계를 나타내었다. 토지이용별 EC의 변화는 자연수질지역 <농업지역<주거지역<시설재배<축산지역 순으로 나타났다. EC는 월별강수량에 따라 영향을 받는 것으로 나타나 비점원 오염물질의 지하침투가 상당히 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 축산지역의 EC는 상당한 변화를 보여 강우 외에도 축산관리방법 등이 오염물질의 지하이동에 중요한 역할을 하는 것으로 사료된다. 주거지역이 농업지역보다 더 높은 EC값을 나타내는 것으로 볼 때 농촌지역의 지하수질을 보전하기 위해서는 주거지역에 대한 지하수 보전대책의 수립이 필요함을 보여주고 있다. 시설재배지나 축산지역을 통과하며 오염된 지하수는 영농지역을 통과하며 오염물질의 농도가 낮아지는 경향을 나타내 상대적으로 비료를 덜 사용하는 논과 밭에서는 지하수 수질이 회석에 의해 개선되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

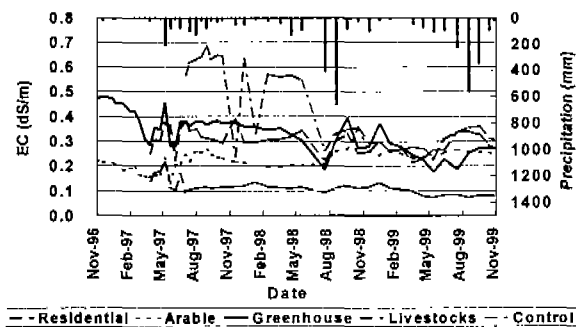


Fig. 2 EC change of groundwater with respect to land use and time.

Table 2 Results of descriptive statistics of $\text{NO}_3\text{-N}(\text{mg/l})$ for the groundwater samples

	Mean	Median	Std.dev	Min.	Max.
Residential	16.19	15.36	8.195	2.53	61.47
Arable	9.01	7.14	7.785	0.61	61.47
Greenhouse	18.95	20.36	6.662	7.18	45.01
Livestocks	23.79	18.78	18.573	1.54	62.29
Control	2.10	1.44	2.189	0.43	12.12
Average	14.01	12.62	8.681	2.46	48.47

3.2.2 질소

Table 2은 토지이용별 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도이다. 농업지역과 자연수질지역 제외하고는 먹는 물 및 먹는 샘물 수질기준인 10 mg/l 를 초과하고 있다. 도시상수도 시설이나 간이상수도가 없는 집약농업 지역의 식수와 생활용수는 주로 지하수에 의존하기 때문에 얕은 지하수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 관리가 필요하다.

Figs 3, 4, 5는 토지이용에 따른 Org-N과 $\text{NH}_4\text{-N}$, 그리고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 Org-N(유기성 질소)는 영농활동이 시작되는 3월부터 11월까지 상당히 큰 폭으로 변동하였으며 비영농기에는 비교적 작은 값을 나타냈다. 1차년도에는 비교적 높은 Org-N 농도를 보였으나 2차년도와 3차년도에는 비교적 낮은 값을 나타냈다. 1차년도에는 지하침투량이 작아 지하수로 유입되는 Org-N의 농도가 높았고 2차년도와 3차년도에는 강우량이 상대적으로 많아 지표와 불포화층에 잔류하던 Org-N이 지하침투되면서 희석되는 것으로 생각되었다. $\text{NH}_4\text{-N}$ (암모니아성 질소) 농도는 Org-N 농도와 같은 시간대에 증가하고 감소하는 경향을 보였으나 토지이용별로 유의성 있는 차이는 나타나지 않았다. Fig. 4에서 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 다른 오염인자와는 달리 축산지역에서 낮은 농도를 나타냈으며 시설재배지역에서 가장 높게 나타났다. 시설재배지역의 경우 일년 내내 영농활동이 있기 때문에 비료의 사용량이 다른 지역에 비해 상대적으로 많으며 또한 항상 관개가 이루어지기 때문에 지하 침투량도 증가하기 때문에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 부하량이 상대적으로 증가하여 높은 농도를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도에 비해 매우 낮게 나타났으며 이는 연구유역이 모래가 많은 양토로 통기성이 좋아 질산화반응이 용이하여 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 $\text{NO}_3\text{-N}$ (질산성 질소)으로 쉽게 변하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 Org-N 농도나 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도에 비하여 매우 높게 측정되었다. 토지 이용별 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도의 크기는 EC와 같이 자연수질지역<농업지역<주거지역<시설재배지역<축산지역 순으로 나타났다. 토지이용별 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도와 EC의 변화가 비슷하다는 것은 이들 사이에 상관관계가 존재할 수 있음을 암시한다. 1차년도와 2차년도, 3차년도의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도변화에 차이가 있는 것은 강우의 영향이 큰 것으로 생각된다. 강우량이 큰 폭으로 증가한 2차년도, 3차년도의 경우 지하침투량 증가로 인한 오염물질의 희석으로 인해 1차년도 농도보다 낮은 것으로 생각되었다. Fig. 6은 농업지역인 12번 관측정에 대한 질소 농도의 구성을 보여준다. 총질소(T-N)의 농도는 $\text{NO}_3\text{-N}$, Org-N 및 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도의 합으로 나타났다.

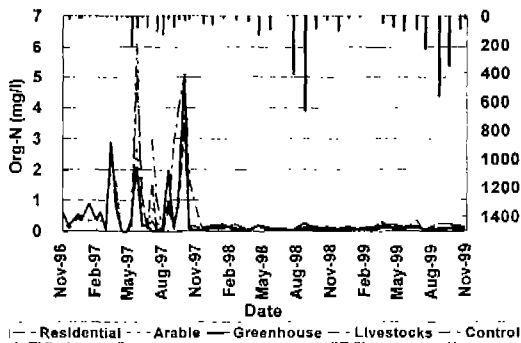


Fig. 3 Org-N concentration change of groundwater with respect to land use and time.

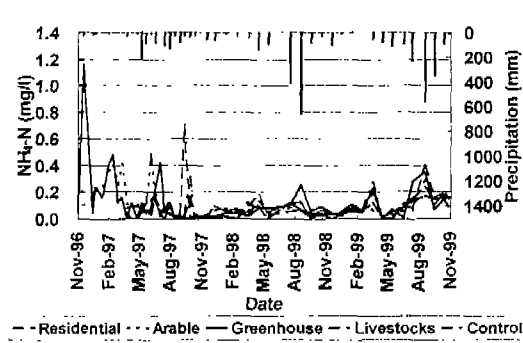


Fig. 4 $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration change of groundwater with respect to land use and time.

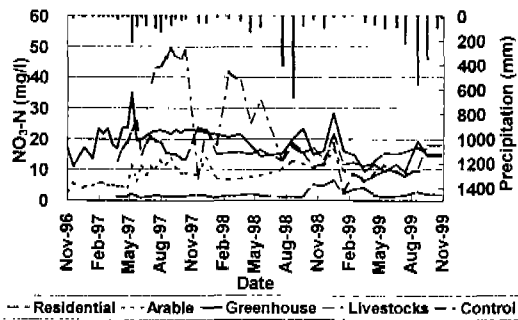


Fig. 5 NO₃-N concentration change of groundwater with respect to land use and time.

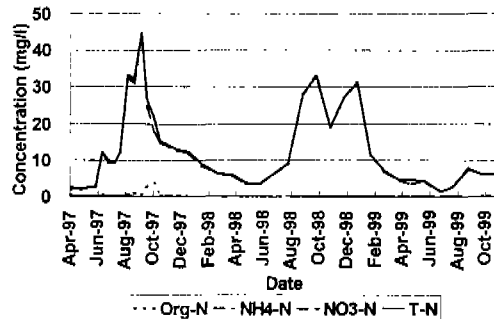


Fig. 6 Nitrogen concentration change of No. 12 well with time.

T-N 농도 중 NO₃-N의 농도가 90% 이상 차지하고 있어 총적층 농업지대 지하수의 T-N 농도는 NO₃-N 농도에 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 따라서 T-N 농도의 시간별 변화는 NO₃-N 농도의 변화와 매우 유사하게 나타났다. 비점원 오염량이 상대적으로 작은 자연수질지역의 평균 T-N 농도는 2.54 mg/l 정도로 비교적 낮았고 표준편차도 작아 계절별 변동이 작았다 (Table 3). 그러나 다른 토지이용지역의 평균 T-N 농도와 표준편차는 상대적으로 크게 나타나 주거 및 영농활동에 의한 오염물질의 유입특성이 매우 다양함을 보여준다. 지하로 침투된 영양물질들은 지하수와 함께 서서히 하천으로 배수되어 하천의 질소 농도는 11월에서 1월 사이에 높게 나타난다 (최중대, 1996). 효율적인 지하수의 수질관리를 위해서는 오염물질의 지하수 유입특성을 정성적 및 정량적으로 기술할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

3.2.3 EC 및 T-N과의 관계

지하수질에 영향을 미치는 오염인자들 사이의 상관관계를 조사하기 위해 788개 수질관측치에 대해 상관도를 분석하였다. 분석 결과 EC와 T-N 은 상당히 높은 상관성을 보였다. Fig. 9는 EC와 T-N의 상관관계($R^2=0.6480$)를 나타냈고 특이 값들이 있기는 해도 비교적 간단히 측정할 수 있는 EC를 이용하여 총적층 농업지대 지하수의 T-N 농도를 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 3 Results of descriptive statistics of T-N (mg/l) for the groundwater samples

	Mean	Median	Std.dev	Min.	Max.
Residential	16.66	15.46	8.347	2.57	61.71
Arable	9.41	7.42	7.748	0.79	61.71
Greenhouse	19.41	21.14	6.895	7.32	45.29
Livestocks	24.46	18.88	19.418	1.70	65.05
Control	2.58	1.85	2.416	0.49	12.14
Average	14.50	12.95	8.965	2.57	49.18

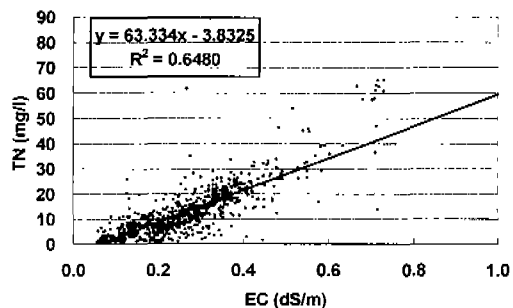


Fig. 9 Correlation between EC and T-N concentrations.

V. 결 론

북한강 수계의 총적층 평야에 위치한 농업지역의 토지이용에 따른 지하수 수질의 변화를 기술하기 위한 모니터링 연구를 수행하였다. 20개의 농가 우물(펌프)을 관측점으로 선정하여 1 내지 2년 동안 2주일 혹은 1달에 1회씩 지하수 수질시료를 채취하고 EC, T-N, Org-N, NO₃-N, NH₄-N, T-P 등에 대하여 분석하였다. 분석된 수질자료를 이용하여 지하수 수질의 계절적 및 연간 변화양상을 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

1. EC는 상류부 관측점에서 낮게 나타났고 하류부로 이동하면서 점차 증가하는 경향을 보였다. 자연수질지역의 EC 중앙값은 0.112 dS/m로 다른 토지이용지역 중간값의 32~50% 정도였다. 토지이용별 EC의 값은 자연수질지역<농업지역<주거지역<시설재배<축산지역 순으로 나타났다.

2. 농업지역과 자연수질지역 제외한 주거지역, 축산지역 및 시설재배지역 지하수의 평균 NO₃-N 농도는 먹는 물 수질기준인 10 mg/l를 초과하였다. 지하수의 Org-N과 NH₄-N의 농도는 NO₃-N 농도에 비하여 상대적으로 작았기 때문에 T-N의 농도는 주로 NO₃-N 농도에 영향을 받았다. 농업지역 지하수 T-N 농도의 90% 이상은 NO₃-N 농도가 차지하여 NO₃-N가 농업지역 지하수 질소오염의 가장 큰 오염원으로 밝혀졌다. 토지이용별 NO₃-N 농도의 크기는 자연수질지역<농업지역<주거지역<시설재배지역<축산지역 순으로 나타났다. 지하수 T-N 농도는 영농초기보다는 영농후기인 9월에서 11월 사이에 높은 값을 보였다.

3. EC와 T-N 농도는 높은 상관관계를 보였으며 R²는 0.6480였다.

4. 연구구역의 지하수 수질은 토지이용뿐만 아니라 강우와도 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 강우현상은 시간에 따라 많은 변화가 있으므로 이를 고려할 수 있는 장기간의 지하수 수질 모니터링 연구가 요구된다.

사 사

본 연구는 1996년과 1997년도 교육부 학술연구조성비 과제번호 96005와 97005 (농업과학 기기센터 공동연구 지원사업)와 1998년도 학술진흥재단 과제번호 500-19981074 의 지원으로 수행된 연구결과의 일부임.

참 고 문 헌

- 1) Duda, A.M., Addressing nonpoint sources of water pollution must become an international priority. *Water Science Technology* pp. 28:1-11(1993)
- 2) Magette, W, L., *Citizen's guide to Environmental Terminology*. Cooperative Extension Service, University of Maryland, Water Resources 18. (1989)
- 3) 최중대, 이찬만, 최예환, 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. *한국수자원학회지* pp. 32(4):501-510 (1999)